

The Role of the Multi-scaled Vortical Structures in a Homogeneous Isotropic Turbulence

著者	Abdel Kareem Waleed Sayed Mohamed
号	51
学位授与番号	3645
URL	http://hdl.handle.net/10097/37313

氏 名	あぶでる かりーむ わりーど せいど もはめど
授 与 学 位	Abdel Kareem, Waleed Sayed Mohamed 博士 (工学)
学位授与年月日	平成 18 年 9 月 13 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械知能工学専攻
学 位 論 文 題 目	The Role of the Multi-scaled Vortical Structures in a Homogeneous Isotropic Turbulence (一様等方性乱流における多重スケール渦構造の役割)
指 導 教 員	東北大学教授 福西 祐
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 福西 祐 東北大学教授 中橋 和博 東北大学教授 小濱 泰昭 東北大学助教授 伊澤 精一郎

論文内容要旨

乱流は、冷却や内燃機関における燃焼効率の向上などに大きく寄与する一方で、管内流や流体中を物体が移動する場合には摩擦抵抗の大幅な増大をもたらす。工学的立場から乱流を効率よく制御しようとするとき、乱流についての十分な知識が不可欠となる。乱流は大小様々なスケールの運動からなり、その中でエネルギーが大規模な運動から小規模な運動へと伝わるエネルギーカスケード機構が存在していることが知られているが、このエネルギーカスケード機構と乱流中の流れの基本構造である渦構造との関係は明らかになっていない。

本論文は、乱流の本質と考えられているエネルギーカスケード過程を渦運動の立場から物理的に明らかにすることを目的として、任意のスケールの渦構造を乱流中から直接抽出し、その動きを追跡することのできる解析手法を確立すべく行われた研究をまとめたものである。論文は、渦構造の抽出方法さらに抽出された渦構造の骨格の特定方法を新たに提案し、これらの方法を用いて乱流場を解析しその本質について論じており、全 6 章からなる。

第 1 章は序論であり、本研究の背景と研究の目的について述べている。

第 2 章では、まず本論文を通しての解析対象である一様等方性乱流場を格子ボルツマン法 (Lattice Boltzmann Method: LBM) を用いて生成する方法について述べている。乱流強度を維持するため LBM の支配方程式に連続の式を満たす加振項を加え、波数 3 以下の低波数領域に毎ステップエネルギーを注入している。計算格子数は 128^3 と 256^3 の 2 種類であり、流れ場のテイラー長レイノルズ数はそれぞれ 55 と 81 である。フーリエフィルターをかけない流れ場に対して Q 法を適用して可視化すると、図 1 に見られるように乱流は小さなスケールの渦構造の集合体として表され、エネルギー保有領域にある低波数の速度変動を生み出す規模の大きな渦構造を見つけることはできない。しかし本論文では、一様等方性乱流の速度場あるいは渦度場に対してフーリエ変換およびフーリエ逆変換を適用してフィルターリング処理を行った後で速度勾配テンソルの第 2 不変量 Q を求める手順を採ることにより乱流中から様々なスケールの渦構造が抽出できることが示された。また、本論文では、流れ場を渦運動が支配的な Q 値が正の領域 (コヒーレント領域) とせん断力が卓越した Q 値が負の領域 (非コヒーレント領域) に分離し、エネルギーの伝達はコヒーレント領域の渦構造が担いその散逸は非コヒーレント領域が担っていることを明らかにしている。さらにその中で、非コヒーレント領域中には散逸領域の小さなスケールの運動のみならずエネルギー保有領域の大きなスケールの運動も存在していることを見出している。これらの知見は乱流のエネルギー機構の理解に繋がるもの

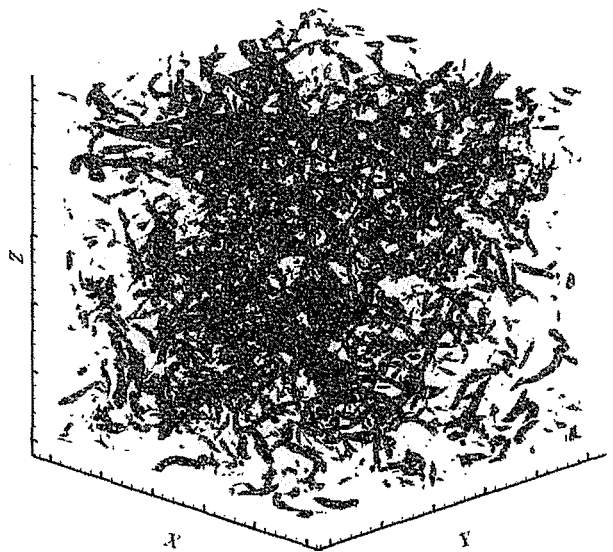


図 1: Q 値の等値面 (フィルターなし)

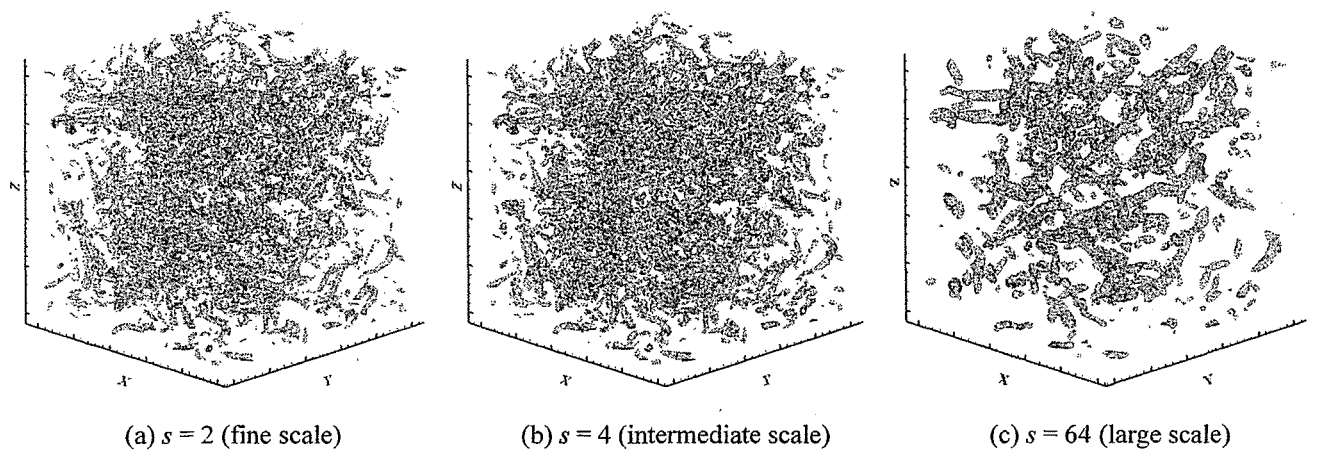


図 2：ウェーブレット変換による渦構造の抽出

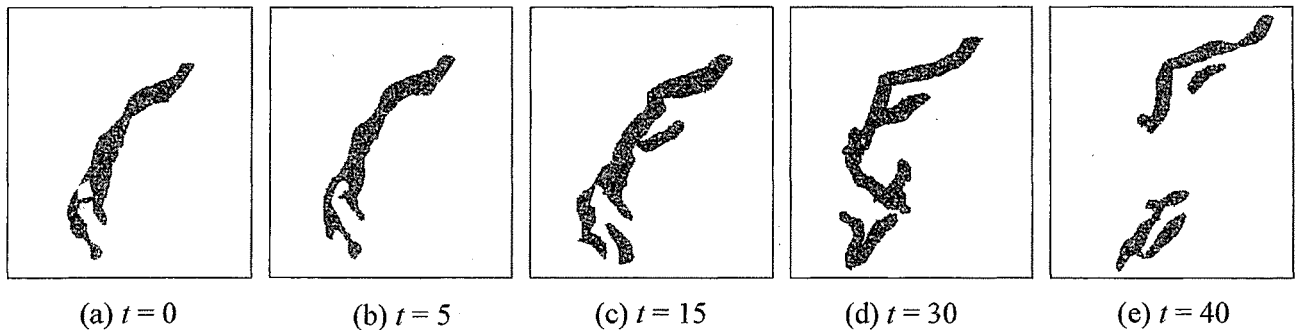


図 3：渦構造の追跡 (intermediate scale)

で、工学的に重要な成果である。

第 3 章では、第 2 章のフーリエ変換による抽出法と速度勾配テンソルの第 2 不変量 Q の場から各スケールの渦構造をウェーブレット変換を応用して直接抽出する方法との比較を行っている。ウェーブレット変換では、スケールパラメータ s を変えることで任意のスケールの渦構造を抽出することが可能であり、 Q 値を直接フィルタリングするのでフーリエフィルタによる方法に比べるとデータ数が少なく済む利点がある。図 2 はウェーブレットフィルタリングによる各スケールの抽出結果である。フーリエフィルタによる方法との比較から、それぞれの方法で抽出された渦構造の重複率が 75%~90% 以上と非常に高いことを示すとともに、渦構造の伸縮率や速度勾配テンソルの第 2, 第 3 不変量 Q , R の分布形態が渦構造のスケールによらず互いによく似たパターンを示すことを明らかにしている。この結果は、異なるスケール間のエネルギー伝達が同様のメカニズムにより成り立っていることを表しており、スケール間の普遍性を裏付けるもので工学的に重要な成果である。

第 4 章では、フーリエ変換あるいはウェーブレット変換を用いて抽出されたさまざまなスケールの個々の渦構造に着目し、その運動を個別にかつ自動的に追跡する渦構造追跡ツールを提案している。本ツールは従来提案されている方法に比べ、必要とするデータ量が少なくすみ、取り扱いが簡易で、しかも渦構造が分裂あるいは合体する場合にも追跡が継続できるという優位点があることを、具体例を挙げながら示している。その際、抽出される渦構造の体積に比べて体積の非常に小さい渦構造をノイズと見なして予め流れ場から取り除く処理が有効に働くことを見いだしている。この操作を加えることで渦構造の輪郭がよりはっきりとし、その形状の変化を追跡しやすくなる。例えば大きなスケールの場合、流れ場から取り除かれた渦構造は全体の 20% 程度、個数にして 3,400 個ほどであるが、抽出対象である渦構造に比べると十分に弱く流れ場への影響は少なく、取り除くことによる悪影響はないことを確認している。本ツールを用いた流れ場の解析結果から、大きなスケールの渦構造は伸張と同時に分割される傾向があるのに対して、渦構造のスケールが小さい場合、分割は伸張に遅れて起こることを報告している。図 3 は、中間スケールの渦構造を流れ場から抽出しそのうちの一個を追跡した例である。ひも状の渦構造が伸張を受け複数に分割され、次第に離れていく様子

が現れている。このように渦構造が複雑であったり分割によって渦構造が複数になったりしても、それぞれの渦構造を追跡することができていることは特筆すべき点である。本ツールは流体力学その他分野でも適用可能と考えられ、工学的に有用な成果である。

第5章では、抽出した渦構造の中心軸を求める方法を新たに提案している。速度勾配テンソルの第2不変量 Q に着目することで、必要とするデータ量が少なく簡便ながら従来用いられてきた方法に対して遜色のないことを示している。この方法は非常に簡単で、具体的な手順は以下の通りである。まず、探索開始点として Q が最大となる点を求め、この点を含む渦構造を対象に選ぶ。次にこの渦構造の端から、 Q 値がしきい値以上の格子点を選んで行き、その数がスケールに依存した規定値に達するとそれらの点の重心を中心軸の節点と定め、これらの格子点を取り除いて上記処理を繰り返す。このようにして中心軸は折れ線として求まる。この方法をフーリエフィルターとウェーブレットフィルターによって抽出された各スケールの渦構造に適用したところ、渦構造の長さ、半径、渦構造と渦度との関係、さらに大小スケールの渦構造間の関係等について様々な新たな知見を見出ししている。図4は、渦構造の中心線と渦度ベクトルの関係を調べたものである。渦度ベクトルの方向はほぼ渦構造の中心線に一致しており、渦構造が大きいほどその傾向が強いことがわかる。このとき、渦構造の半径の確率密度分布を見ると、小さな渦構造の半径はコロモゴロフ長の6~8倍程度、大きな渦構造の半径は10倍程度の位置にピークが見られ、大きな渦構造の長さは小さな渦構造の長さのおよそ2倍であった。また、渦構造の中心線とせん断速度テンソルの主軸の方向のなす角は、渦構造のスケールによらずほぼ50度で一定になる。図5は、渦度ベクトルと $\omega_{ij}S_{ij}$ のなす角の関係を示したものである。 $\omega_{ij}S_{ij}$ は渦度輸送方程式に現れる項で、渦度ベクトルの強さと向きの変化を表している。この図から、小さなスケールの渦構造ほど伸張されやすく、大きなスケールになるとその頻度が低下し、収縮する場合も多いことを見出ししている。これらの新たな知見は、乱流を解析し理解を深めて行く上での重要な情報を提供している。これは工学的に重要な成果である。

第6章は結論である。

以上、本論文では、乱流中から様々なスケールの渦構造を抽出し、それを追跡し、渦構造の骨格の特定する方法を新たに提案している。さらに、これらの方法を用いて乱流場を解析し、乱流中の渦構造の役割に関する新たな知見を得、乱流の本質について洞察しており、工学特に機械知能工学の発展に寄与する所が大である。

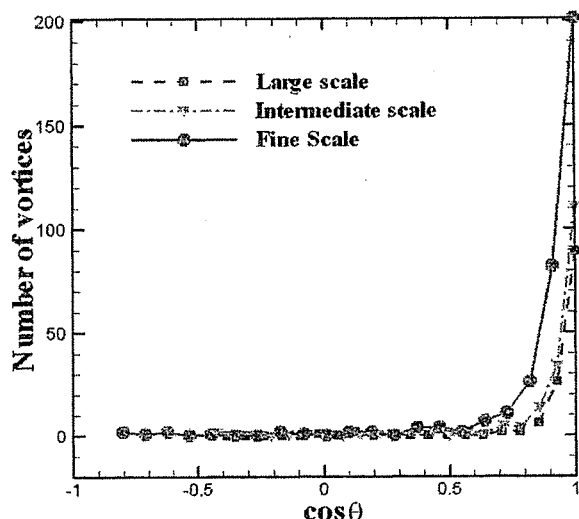


図4：渦構造の中心線と渦度ベクトルのなす角

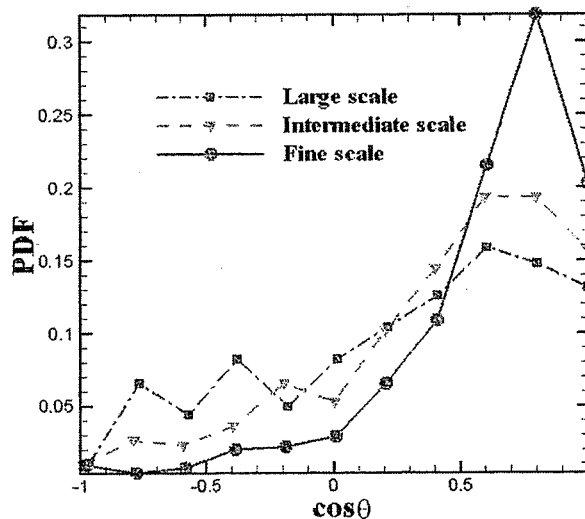


図5：渦度ベクトルと $\omega_{ij}S_{ij}$ のなす角

論文審査結果の要旨

乱流は、冷却や燃焼効率の向上などに大きく寄与する一方で、摩擦抵抗の大幅な増大をもたらす。工学的立場から乱流を効率よく制御しようとするとき、乱流についての十分な知識が必須となる。しかし、乱流の本質と考えられているエネルギーカスケード機構と乱流の基本構造である小規模な渦構造との関係は明らかではない。

本論文は、エネルギーカスケード過程を渦運動の立場から物理的に明らかにすることを目的として、任意のスケールの渦構造を乱流中から直接抽出し、その動きを追跡することのできる解析手法を確立すべく行われた研究をまとめたものである。論文は、渦構造の抽出方法さらに渦構造の骨格の特定方法を新たに提案し、これらの方法を用いて乱流場を解析しその本質について論じており、全6章からなる。

第1章は序論である。

第2章では、一様等方性乱流場を格子ボルツマン法を用いて生成する方法について述べ、フーリエ変換により速度場あるいは渦度場にフィルターをかけることで乱流中から様々なスケールの渦構造が抽出できることを示している。また、流れ場を渦運動が支配的な領域（コヒーレント領域）とせん断力が卓越した領域（非コヒーレント領域）に分離して議論し、非コヒーレント領域の運動は散逸領域が中心となるがエネルギー保有領域にまで広がっていることを見いだしている。この知見は乱流のエネルギー機構を理解に繋がるもので、工学的に有用な成果である。

第3章では、第2章のフーリエ変換による抽出法とウェーブレット変換を応用して速度勾配テンソルの第2不変量の場合から各スケールの渦構造を抽出する方法との比較を行っている。その結果、それぞれの方法で抽出された渦構造の重複率が75%~90%以上と非常に高いことを示すとともに、渦構造の伸縮率や速度勾配テンソルの第2、第3不変量の分布形態が渦構造のスケールによらず互によく似たパターンを示すことを明らかにしている。この結果は、異なるスケール間のエネルギー伝達が同じメカニズムによることを反映しており、スケール間の普遍性を裏付けるもので、工学的に有用な知見である。

第4章では、フーリエ変換あるいはウェーブレット変換を用いて抽出されたさまざまなスケールの個々の渦構造に着目し、その運動を個別にかつ自動的に追跡する渦構造追跡ツールを提案している。本ツールは従来提案されている方法に比べ、必要とするデータ量が少なく済み、取り扱いが簡易で、しかも渦構造が分裂あるいは合体する場合にも追跡が継続できるという優位点があることを、具体例を挙げながら示している。さらに本ツールを用い、大きなスケールの渦構造は分割する際に伸張される傾向があるのに対して、渦構造のスケールが小さい場合その傾向は見られないことを報告している。本ツールは流体力学の他分野でも適用可能と考えられることから、工学的に有用な成果である。

第5章では、抽出した渦構造の中心軸を求める方法を新たに提案している。速度勾配テンソルの第2不変量に着目することで必要とするデータ量が少なく簡便ながら従来用いられてきた方法に対して遜色のないことを示している。そしてこの方法を用いて、各スケールにおける渦構造の長さ、半径、渦構造と渦度との関係、さらに大小スケールの渦構造間の関係等の諸量を測定しており、乱流を解析し理解を深めて行く上での重要な情報を提供している。これは工学的に有用な成果である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、乱流中から様々なスケールの渦構造を抽出し、それを追跡し、渦構造の骨格を特定する方法をそれぞれ新たに提案し、これらの方法を用いて乱流場を解析し、渦構造の役割に関する新たな知見を得たものであり、工学、特に機械知能工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。